太阳能富集低浓度瓦斯实验研究

虞昊天　李娜　周屈兰

（动力工程多相流国家重点实验室，西安交通大学，西安　710049）

摘要：煤矿在生产过程中会将大量含有低浓度甲烷的瓦斯直接排放至大气，造成了严重的能源浪费，也加剧了温室效应。本文针对传统的瓦斯富集技术存在的缺点，提出了利用 Soret 效应进行煤矿瓦斯中混合气的分离和对甲烷的富集。通过理论分析，确定了初始甲烷浓度和温差是影响富集过程的主要参数；并通过实验和数值模拟，研究了这些参数影响富集效果的规律。

关键词： 热扩散；Soret 效应；瓦斯富集

中图分类号： TK019　　　　**文献标识码：** A

Experimental study on enrichment of low concentration coal bed methane with solar energy

YU Haotian　LI Na　ZHOU Qulan

(State key Laboratory of Multiphase Flow in Power Engineering, Xi'an Jiaotong University,　Xi'an　710049,　China)

Abstract: A large number of low concentration methane gas is emitted directly into the atmosphere during the coal production, resulting in a serious waste of energy and the greenhouse effect. Aiming at the shortcomings of conventional coal mine methane enrichment technology existed, the papar presented separation and enrichment coal mine methane with the Soret effect. The theoretical analysis proposed the main parameters of the enrichment process is the initial methane concentrations and the temperature gradient. The effect law of these parameters is studied by experiments and numerical simulations.

Key words:Thermal diffusion; Soret effect; Coal mine methane enrichment

基金项目：国家自然科学基金(51106127)和教育部新世纪优秀人才计划(NCET-13-0468)

0 引言

煤矿的生产过程中会将大量含有低浓度甲烷的瓦斯直接排放至大气。我国的煤矿瓦斯具有数量巨大、产地分散、单井规模小、井下抽采气浓度低并含氧等特点，必须有安全、经济的分离储运技术才能充分合理利用[1]。据统计，我国每年有 180 亿立方米以上的纯甲烷混入矿井风流中通过乏风排空，相当于 3600 多万吨煤炭，造成了严重的能源浪费[2]。同时，甲烷是一种重要的温室气体，此举也加剧了温室效应。现行的富集瓦斯的主要技术途径有深冷分离技术、膜分离技术和变压吸附技术。这些技术存在着能耗高、投资大和技术难度大的缺点[3]。因此，瓦斯的富集利用未能广泛开展。

为解决该能源浪费和环境危害的问题，针对传统的瓦斯富集技术存在的缺点，本文提出了利用 Soret 效应进行煤矿瓦斯中混合气的分离和对甲烷的富集，将太阳能利用和煤矿瓦斯富集相结合，由两种低品位能源加工生产出较高品味的清洁能源。和传统的瓦斯富集系统相比，本文设计的瓦斯富集系统具有结构简单，工作可靠，易于维护的优点。同时，该系统的规模可以根据煤矿的瓦斯产出量而灵活设计和建造，相对传统的富集技术的投资较少。本文通过理论分析，确定了初始甲烷浓度和温差是影响富集过程的主要参数；并通过实验和数值模拟，研究了这些参数影响富集效果的规律。

1Soret 效应富集瓦斯的原理

Soret 效应又称热附加扩散效应，是指在不等温的温度场作用下，均匀流体混合物中的组分发生迁移，向容器的冷热两壁移动浓缩，形成浓度梯度的现象，于 1879 年由瑞士科学家 J. Soret 首次发现并命名。由于该分离富集过程只受到温度差和待分离混合物自身物性的影响，具有分离设备简单、投资少、运用灵活性强等优点，在分离领域中已被用于进行同位素的分离、可控热核反应堆气体产物的分离和同素异构有机物的分离，应用前景十分宽广。

热附加扩散过程所需的温差可以由太阳能提供，这将减少系统运行的成本和能耗。根据申文明等[4]的研究成果，可以通过施加涂层和加装透明盖板的方法帮助管道吸收太阳能，并使管内温度保持在 150℃。本文在实验中使用温控加热板在该温度范围内对实验管道进行加热，模拟阳光的加热效果。

热附加扩散效应的研究表明，在一个浓度均匀的二元系统内施加一定的温度梯度，将发生热附加扩散传质并建立起稳定的浓度梯度[5]。热附加扩散系数可取正值、零和负值。正值代表组分在冷区浓缩，温度梯度的存在产生从高温到低温的传质；负值代表组分在热区浓缩，温度梯度的存在产生从低温到高温的传质。根据二元混合气体组分的浓度方程：

$$\frac{\partial c_i}{\partial t}+\mathrm{div}(Uc_i)=D_{12}\mathrm{div}(\nabla\cdot c_i)\pm D_{\mathrm{T}}\mathrm{div}(\nabla\cdot\ln T)(1)$$

式中：

c_i ——组分的摩尔浓度/mol·m^{-3}，i=1，2 分别代表混合气体中的重质气体和轻质气体；

t ——时间/s；

U ——速度/m·s^{-1}；

D_{12} ——气体扩散系数/m^2·s^{-1}；

D_{T} ——$D_{\mathrm{T}}=D_{12}\cdot k_{\mathrm{T}}$ 为热扩散系数/m^2·s^{-1}，k_{T} 为热扩散比。

方程中重质气体取“+”号，轻质气体取“-”号。

考虑到本文的实验中管内的气体是甲烷与空气的混合气，而空气的主要成分是氮气，其相对分子质量也与氮气相近，为便于理论分析，将实际的混合气合理近似为甲烷与氮气的二元混合气体。根据该方程，在存在温度梯度时，甲烷和氮气的混合气体中的甲烷会从低温面向高温面传质，氮气会从高温面向低温面传质。同时，根据菲克扩散效应，由于上述过程产生了浓度梯度，所以扩散传质也开始进行。由该方程可知，任意时刻在任意截面上两种气体的传质通量大小相同，方向相反。对于其中的一种气体，当热附加扩散和菲克扩散的传质速率相等时，浓度场的变化达到了动态平衡。

由式 1 可知，影响热附加扩散传质的因素是组分的摩尔浓度、时间、温度、气体扩散系数和热扩散比，其中后两者由气体本身的物理性质决定，对本文的研究对象是已经确定的常数。本文主要研究稳态下的富集效果，实验中给以足够长的时间使系统达到稳态，所以没有研究时间的影响。

根据这样的物理效应，本文设计了具有高温面和低温面的管道，使甲烷和氮气的二元混合物中的甲烷在高温面有较大浓度，氮气在低温面有较大浓度。如果将多个这样的装置级联，当前一级经过充

分长时间的传热传质后，从前一级的高温侧抽取甲烷浓度较大的气体通入后一级；这样从每一级中抽取的气体中甲烷浓度都比通入该级的气体中的甲烷浓度高，就可以很好的实现混合气中甲烷的富集。

2 富集瓦斯实验

2.1 实验系统

本文富集瓦斯所使用的实验系统如图 1 所示。实验中，使用由甲烷和空气配制的混合气模拟瓦斯，分别通过甲烷气瓶的阀门和空气气泵的调节装置控制对应气体的的流量，使两种气体的比例和混合气的流量与设计的实验工况相符。混合气进入管道后，通过整流栅使其迅速分布均匀，并由温度计测得管道内的温度。管道的上表面覆盖有可调节温度的加热板，下表面使用冰水混合物进行冷却。这样在管道高度方向上就获得了较大的温差。管道长 2 米，横截面为宽 150 毫米、高 75 毫米的矩形。

考虑 Soret 效应，处于层流流动状态的混合气在沿管道长度方向流动的同时，受高度方向上温度梯度的作用，其中的两种组分将根据式(1)的描述分别向高温表面(上表面)和低温表面(下表面)扩散。本文在管道的出口使用烟气分析仪抽取管道内不同高度上的气体，以研究混合气中甲烷浓度在高度方向上的分布。

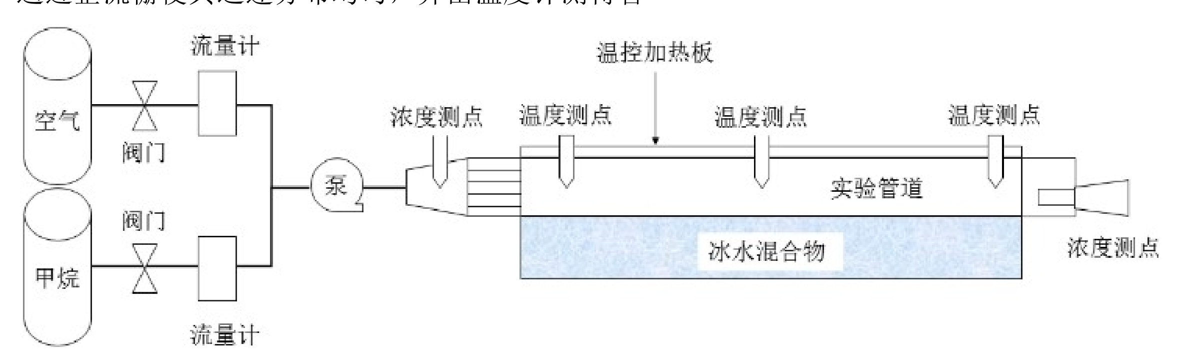


图 1 实验系统图

Fig.1 The experimental system diagram

2.2 实验结果

考虑到甲烷是一种易燃易爆气体，实验工况选取的甲烷浓度低于甲烷的爆炸极限，并且实验中通风良好，避免甲烷在环境中积累造成隐患。为了保证热附加扩散传质充分完成，实验管道内气体的流速较低，根据理论公式的计算结果，结合实验管道的实际长度，选取了 0.001 m/s 的平均流速。实验过程中，受实验器材的限制，管道内能够达到的温差为不超过 100℃。实验结果见图 2、图 3 和图 4。

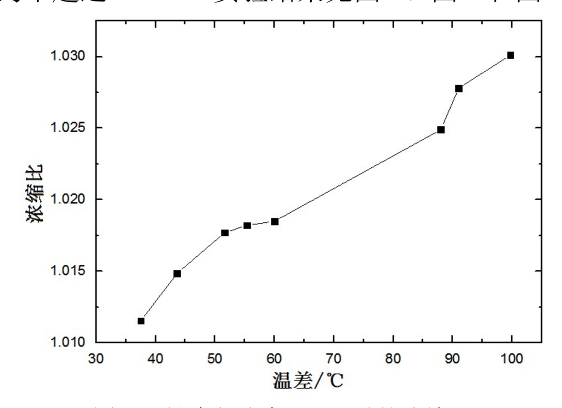


图 2 甲烷摩尔浓度 1.31%时的浓缩比

Fig.2 Theconcentration ratio of methane at 1.31%

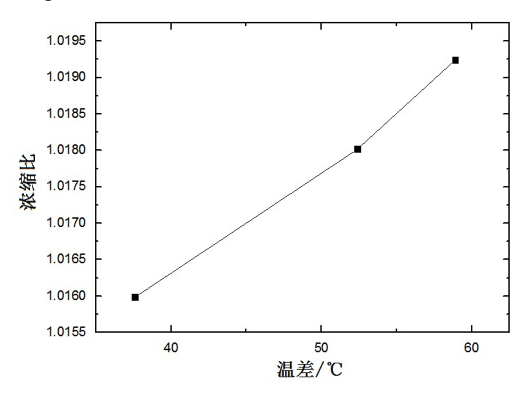


图 3 甲烷摩尔浓度 1.74%时的浓缩比

Fig.3 Theconcentration ratio of methane at 1.74%

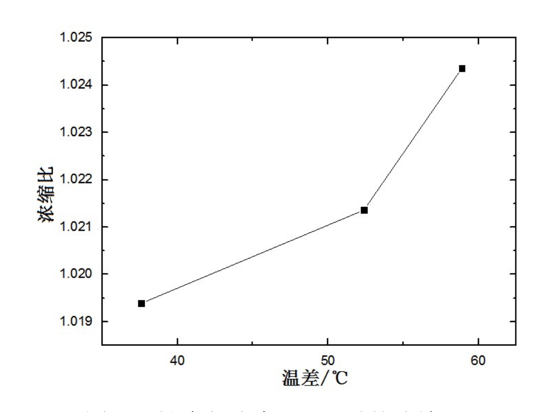


图 4 甲烷摩尔浓度 2.17%时的浓缩比

Fig.4 Theconcentration ratio of methane at2.17%

图中的甲烷摩尔浓度是指通入管道的混合气的甲烷摩尔浓度，温差是管道内实测的高温壁面处气体温度和低温壁面处的气体温度之差，浓缩比是高温壁面处甲烷浓度和低温壁面处的甲烷浓度之比。

图 2 表明，表征富集效果的浓缩比随温差的增大而增大。考虑到实验安全，没有进行更高温差的实验。图 3 和图 4 表明，当通入管道的混合气的甲烷浓度增加后，同一温差下的浓缩比有所提高，这可能是因为甲烷浓度的增加使同一温差下浓度差的绝对值有所增加，从而消除或减弱了一些干扰实验结果的负面因素的影响。

本文在甲烷摩尔浓度为 1.31%、没有温差的条件下进行了空白实验。空白实验测得的浓缩比是 0.998，浓缩效果约为有温差条件下的 1/5～1/15。该结果在实验仪器测量误差范围内。因此，本文认为温差是产生富集效果的必要条件。

根据实验数据计算所得的浓缩比与理论计算所得的浓缩比的变化趋势一致，但还是存在一定的差异。尤其是改变温度差和甲烷入口浓度时，浓缩比存在较大的波动。

在高温表面温度、低温表面温度和甲烷初始浓度已知的条件下，可由式(1)推导出本系统的单级理论浓缩比，设为K_c：

$$K_c=\frac{(1+A)c+2A}{(A-1)c+2} \tag{2}$$

式中，c 为混合气中甲烷的摩尔分数；A 为中间变量，$A=\mathrm{e}^{\alpha\cdot\ln\frac{T_h}{T_c}}$，其中：$\alpha$ 是热扩散常数，由物性决定且不随温度变化，T_h 是高温表面温度/K，T_c 是低温表面温度/K。

通过对比发现，实验所得的浓缩比均低于理论浓缩比。对理论值与实验值之间的差异以及实验数据存在波动的原因有如下分析：

(1) 恒定的温度场导致轻质分子和重质分子分别向热端和冷端扩散，是利用温度差富集甲烷的原理，本实验中由于加热板对冷壁面处的温度影响较大，温度差随着时间增加而减小，并没有建立真正意义上的恒定温度场；

(2) 理论计算中假定输送管道的两侧面是绝热边界，而实验中的边界并非如此；

(3) 管道高度较低，气流量也较小，烟气分析仪在抽气时会影响浓度场和温度场的分布，；

(4) 根据测量需要，烟气分析仪探头处加装有三通装置，其中控制烟气分析仪在管道中抽气量的流量计的读数，对甲烷浓度的测量值影响很大，存在测量误差；

(5) 输送管道长度有限，混合气在管道内混合不够充分，导致与理论分离极限存在差异。

3 结论

(1) 瓦斯在温差作用下发生热附加扩散，混合气中的轻质组分甲烷会向高温表面传质，重质组分氮气会向低温表面传质，直至与菲克扩散效应达到动态平衡。利用这一物理现象可以富集瓦斯中的甲烷。

(2) 对富集效果影响较大的参数是初始甲烷浓度和温度差。

(3) 在层流条件下，管内混合气的富集过程受管道上、下表面的温差影响较大；其它条件相同时，混合气的各组分在管内的最大浓度差随截面上最大温差的增大而增大。

(4) 温差一定时，增加管道长度或降低管内气体流速(均增加了气体在管内的停留时间)可以提高富集的浓缩比。

(5) 考虑到阳光的加热能力，实际系统的温度差是一定的。由于单级管道的浓缩比受温度差的限制，为了提高最终产气中的甲烷浓度，可以将多个这样的装置级联，当前一级达到该温度差下的最大浓缩比后，从前一级的高温侧抽取甲烷浓度较大的气体通入后一级；这样从每一级中抽取的气体中甲烷浓度都比通入该级的气体中的甲烷浓度高，理论上可以在不太大的温度差下将最终产气中的甲烷浓度提高到需要的值。

本系统构思之初是为了解决煤矿瓦斯排空造成

的能源浪费和温室效应的问题，考虑到甲烷是一种重要的能源化工原料，浓缩之后的煤矿瓦斯可以经过进一步加工、提纯，应用于能源、化工等很多其他领域。这不但实现了温室气体甲烷的减排，还回收了大量煤矿瓦斯富含的化学能，具有节能减排，变废为宝的积极意义。

本文所做的工作主要在于提出一种新的煤矿瓦斯富集技术，检验了其技术可行性和在一定自然条件下的可行性。本文通过实验研究和数值模拟找出了影响该过程的主要因素和基本的影响规律。但是目前得到的结论还很基础，距离工业应用的差距依然很大，进一步的研究可以从以下几个方面进行：

1) 搭建更大规模的实验管道，以发现现有技术应用于工业实际时可能出现的问题并着手解决。

2) 使用高性能的数值模拟工作站进行更大规模的数值模拟。由于本系统是一种微观传质过程的工业应用，涉及的问题跨越多个数量级，受现有的计算能力限制，已经进行的数值模拟的尺度还很不够，可以进一步开展这方面的工作。

3) 由于太阳能固有的一些特点的限制（能流密度低，不能全天连续工作），本系统用于富集煤矿瓦斯时需要巨大的瓦斯贮存罐和甲烷贮存罐，即增加了建设成本，又需要占用很多土地，不利于系统的布置。可以考虑将本系统与蓄热装置联合布置，使系统可以全天候运行。

4) 单级管道的浓缩比受限于温度差，可以用集热装置进一步增大温度差，使得在管道长度相同的情况下获得更大的浓缩比和更好的富集效果。

参考文献

[1] 中国科学院学部. 关于加强煤层气和炼焦气资源科学回收和安全利用研究的建议[J]. 中国科学院院刊,2007,06:476-477.
Chinese Academy of Sciences.The Suggestion of Promoting the Research of Coal Gas and Coking Gas Recovery and Utilization [J]. Bulletin of Chinese Academy of Sciences,2007,06:476-477.

[2] 韩甲业,应中宝. 我国低浓度煤矿瓦斯利用技术研究[J]. 中国煤层气,2012,06:39-41.
HAN Jiaye, YING Zhongbao. Study on the Technology of Low Concentration Mine Gas Utilization in China [J]. ChinaCoalbedMethane,2012,06:39-41.

[3] 龙伍见. 我国煤矿低浓度瓦斯利用技术研究现状及前景展望[J]. 矿业安全与环保,2010,04:74-77.
LONG Wujia. The Status and Prospect of Low Concentration Mine Gas Utilization Technology[J]. Mining Safety & Environmental Protection,2010,04:74-77.

[4] 申文明, 殷志强, 马迎昌. 中温太阳能集热器[J]. 太阳能,2012,14:49-51.
SHEN Wenming, YIN Zhiqiang, MA Yingchang. A Medium Temperature Solar Collector[J]. Solar Energy,2012,14:49-51.

[5] Bird RB, Stewart WE, Lightfoot EN. Transport Phenomena[M]. 2nd ed.. New York: Wiley, 2002:770.

附页

姓名：虞昊天
通讯地址：陕西省西安市咸宁西路 28 号 西安交通大学能动学院 1692 信箱
手机号码：15029093910
电子邮箱：yht_mail@qq.com